

Application of PLC Technology in the Segmental Shutdown of Turbine Vibration Control in Sediment Environment

Liang Yuan

Honghe Guangyuan Hydropower Development Co., Ltd., Honghe Prefecture, Yunnan, 661100, China

Abstract

Turbine vibration issues frequently occur in sediment-rich environments, adversely affecting equipment operational stability and structural integrity. This study investigates vibration response characteristics under high-sediment conditions, develops real-time identification and segmented shutdown control logic based on PLC systems, analyzes key parameter settings and execution workflows, evaluates dynamic response performance of water-guiding mechanisms under PLC command-driven operations, and assesses the strategy's effectiveness in suppressing vibration peaks and improving control efficiency. The findings provide practical pathways and technical support for vibration risk prevention and intelligent control strategies in complex hydraulic environments.

Keywords

PLC control; turbine vibration; sediment condition; segmental shut-off; real-time control

PLC 技术在泥沙环境水轮机振动控制中的分段关闭应用

袁良

红河广源水电开发有限公司, 中国 · 云南 红河州 661100

摘 要

泥沙环境下水轮机振动问题频发, 影响设备运行稳定性与结构安全性, 文章研究了水轮机在高含沙工况下的振动响应特征, 构建了基于PLC控制系统的实时识别与分段关闭控制逻辑, 分析了各关键参数设定及执行流程, 探讨了导水机构在PLC指令驱动下的动态响应效果, 评估了该策略对振动峰值的抑制性能与控制效率, 可为复杂水力条件下水轮机振动风险防控与智能化控制策略提供应用路径与技术支持。

关键词

PLC控制; 水轮机振动; 泥沙工况; 分段关闭; 实时控制

1 引言

高含沙河流域水轮机运行中易出现结构冲刷与振动响应异常, 持续冲击造成导叶、转轮等部件应力集中, 干扰机组稳定运行。常规振动控制系统响应滞后、干预手段单一, 难以应对动态工况下的快速扰动变化。可编程逻辑控制器具备信号处理快速、逻辑控制灵活、指令响应精度高等特点, 适合构建基于振动阈值判据的实时分段关闭控制机制。文章面向泥沙工况下振动激增问题, 围绕振动特征识别、PLC结构部署、指令执行路径与分段策略效果展开系统研究, 提出具备工程可实施性的控制方案, 为复杂水力扰动下的振动风险管理提供技术支撑。

2 泥沙工况下水轮机振动特征识别

泥沙浓度变化显著影响水轮机不同部位的振动响应特

性, 在高含沙流体中, 需从振动源、传播路径与响应特征等方面识别关键表现:

转轮叶片在受泥沙持续冲刷作用下, 其表面压力分布发生扰动, 激发非对称周期激振力, 易产生中高频段的横向与扭转耦合振动, 频率分布集中在 60~150 Hz, 具有明显的非线性增长特征。

导叶区域受泥沙卷入影响, 局部流道发生紊动, 诱发不稳定水击现象, 导致导叶驱动机构周期性冲击, 其响应频率受含沙量与叶片开度联合作用, 在 20~80 Hz 范围内波动, 振动峰值具有明显突变特征。

主轴轴承部位因泥沙介入导致润滑条件恶化, 轴系在变负荷条件下产生不规则跳动, 轴心轨迹偏移加剧, 表现为低频段 (10~30 Hz) 振动增强, 轴向与径向偏差同步放大, 成为监测诊断中的重点指标区段。

3 PLC 控制系统的结构配置与通信逻辑

3.1 控制单元在水轮机振动信号处理中的作用

PLC 控制单元在振动信号处理环节中承担多级判据分

【作者简介】袁良 (1992-), 男, 中国云南曲靖人, 本科, 工程师, 从事水电站水轮发电机技术研究。

析任务,加速度传感器的数据进入采集端后经过带通滤波、阈值比较与趋势识别模块,系统根据振动幅值与频率变化识别潜在激振源。控制单元依据设定的振动等级表,将不同监测点的加速度值分配至对应风险区间,形成动作选择依据,使振动响应的判断建立在实时连续数据结构上^[1]。电流扰动信号与压力波动信号在输入侧以等周期方式采集,并与加速度数据形成时间对齐关系,使振动源特征具备可关联性与可跟踪性。

振动处理逻辑中,PLC内部以扫描周期为基础对数据块进行解析,各参数在同一周期内完成对比、记录与触发判断,减小数据延迟带来的处理误差。在振动峰值接近阈值的阶段,控制单元根据历史变化率进行短时预测,使下一周期的控制动作具备前置性,使分段关闭逻辑能够在振动上升阶段提前进入准备状态。该机制在高含沙流场的突变工况下展现较高的稳定性,使控制动作紧贴振动变化的动态趋势。

3.2 现场信号采集与 PLC 模块连接方式

振动信号采集系统以多节点分布结构布设在转轮壳体、导叶联动轴、主轴轴承座等关键部位,传感器选用三轴电荷型加速度计,并接入远程 I/O 模块进行信号统一处理。每组采集单元按照空间位置划分采样通道,采用差分信号接入方式抑制线路干扰^[2]。在物理层面,传感器与 PLC 主站之间通过 PROFINET 高速总线建立数据链路,具备低延时、自动地址识别与采样同步功能。现场 I/O 模块具备边缘计算能力,可对原始信号执行限幅、整流、数字滤波等预处理操作,减少 PLC 主控程序的计算压力。采集信号以浮点格式封装并写入数据寄存器,配合程序扫描周期进行实时刷新,保障控制逻辑与现场数据在时间轴上完全对齐。

为避免泥沙扰动导致的短时毛刺影响控制系统判断,需对加速度原始波形进行滑动积分处理,提取每个周期内的有效振动幅值。该处理采用周期积分计算表达如下:

$$a_k = \frac{1}{T_s} \int_{t_k}^{t_k+T_s} a(t) dt$$

式中, a_k 为第 k 个采样周期的等效振动加速度值, T_s 表示采样周期长度, $a(t)$ 为时域中的瞬时加速度信号。该公式在采样控制流程中用于将高速波动的加速度信号转换为周期内的平均响应水平,使控制系统对结构性振动的识别更加稳定。在 PLC 程序中,积分值经阈值比较后作为触发判据,若连续两个周期 a_k 均超过设定阈值,控制逻辑进入第一段关闭准备状态,避免短时干扰信号误触控制流程。

总线通信过程中,振动信号数据包按照时间戳自动编号,进入 PLC 缓存区后由主程序按采样先后顺序读取。通信系统具备丢包检测与重传机制,可保障关键数据在链路波动状态下的完整性。远程采集节点的更新频率设为 10 ms,在非稳态运行阶段将自动提升至 5 ms 频率,匹配控制模块中断触发频率,使分段关闭动作在振动激增阶段具备前馈性质。整体信号链的配置结合了时间精度、传输速率与采样稳

定性,为分段关闭策略提供高一致性数据基础。

3.3 多工况切换中的控制程序执行机制

PLC 控制程序以状态判断结构为核心,将水轮机工况划分为正常、预警、超限与保护四个区段。程序在扫描周期内读取全部振动参数并与对应区段阈值进行比较,当参数进入临界区间时,系统切换至预警状态,通过状态字写入方式进入分段关闭准备流程^[3]。控制程序在切换逻辑中设置动作延时表,使不同段位的关闭动作按时间序列执行,使结构冲击降低到可控范围。控制机制能够在泥沙扰动突增的阶段保持动作平稳性,使导水机构避免出现过度压降或非正常冲击状态。

突发振动状态下,PLC 程序根据多信号交叉结果切换至保护模式,使分段关闭指令获得优先级,避免非关键逻辑占用控制周期。程序内部设置的停机联动指令在振动超出上限条件时立即触发,使机组在高风险条件下脱离激振源。工况切换结构在所有环节均以实时信号为依据,使控制流程具备自适应能力,使泥沙干扰下的快速扰动能够在单周期内得到抑制。

4 分段关闭策略的应用路径与控制效果

4.1 分段关闭触发条件的参数设定

在高含沙工况下,振动响应受颗粒扰动与流态变化双重影响,控制策略需以加速度幅值与频率波动率作为核心触发参数。加速度信号从多个传感节点采集后进行实时滤波,提取出的有效幅值作为振动响应强度的参考值,与设定阈值进行逐周期比较^[4]。频率波动率采用连续三周期的主频变化幅度作为识别依据,在突变状态下能提前捕捉异常趋势。系统设定多个等级阈值,分别对应不同段位的导叶关闭动作,形成递进式响应模型。

各段位的控制阈值基于历史振动数据与工程测试数据统计结果设定,保证在不影响功率输出的前提下完成振动风险抑制。触发条件设定过程中,引入了差分速率判断模型,以避免偶发冲击或噪声误判引发误动作。例如,在中等含沙率下,转轮区段加速度阈值设为 4.5 m/s²,若连续两个周期均超限且频率变化超过 12 Hz,则系统直接进入第一段关闭动作逻辑。此设定策略能在系统负荷变化未充分反应前完成预警与响应准备,提升整个调控链条的同步稳定性。

4.2 导水机构的分段动作控制方式

PLC 控制系统将导水机构划分为若干控制单元,每一单元包含两至三片导叶,按水力分布特征依次编组,实现分区闭合动作的独立触发控制。在触发逻辑中,PLC 系统接收到超限信号后会调用对应段位的关闭指令,并设定动作时间窗与反馈验证机制。每段关闭执行顺序固定,由中心叶片向两侧依次收拢,形成水流扰动逐步削弱的动态过程,避免水击叠加或流态紊乱引起的二次振动。

控制动作期间,PLC 模块根据各叶片的位移反馈信号

实时修正下一阶段动作节奏，若某一叶片未按预期完成关闭，其后续段位动作将延迟执行，确保每一步动作在稳定前状态闭合完成。系统还内置状态保持机制，若某一段位关闭后振动值未下降，系统会暂停后续动作，并记录控制异常信息以供运维人员分析。该分段控制方式相比整体关闭可显著降低流道扰动强度，延缓能量传递节奏，使系统在高频振动干扰下保持更高的结构稳定性。

4.3 分段策略对振动幅值变化的控制结果

在高含沙干扰状态下，水轮机各结构区域的振动响应存在显著差异，控制策略的评估需基于不同部位振动值的变化趋势进行量化分析。转轮区域受冲击激励集中，振动频率集中在中高频段，导叶区域表现出流态扰动导致的周期性非线性响应，主轴段在润滑恶化与轴偏移下呈现低频放大特征^[5]。在实际运行过程中，PLC 控制系统以导水机构为响应执行端，将振动超限触发的关闭动作逐段下达，通过叶片收拢调整流量路径，使流场扰动逐步削弱。

控制效果的量化评估以加速度变化为核心指标，在策略实施前后，采集相同测点下的加速度有效值，对比不同泥沙浓度下的响应变化，能够清晰反映分段关闭动作的结构减振成效。测点选取覆盖典型受力与传导路径位置，采样周期一致，振动数据经滤波处理后进行幅值提取。为呈现具体振动变化情况，列出中、高含沙工况下控制前后关键部位的振动加速度对比结果如下表 1 所示：

表 1 分段关闭控制前后各结构部位振动幅值对比表
(单位: m/s^2)

工况类型	监测位置	控制前加速度	控制后加速度
中含沙工况	转轮边缘	5.7	3.9
中含沙工况	导叶区域	4.2	2.8
中含沙工况	主轴下部	3.5	2.3
高含沙工况	转轮边缘	7.9	5.2
高含沙工况	导叶区域	6.4	4
高含沙工况	主轴下部	5.8	3.6

在中含沙工况下，转轮边缘区域振动加速度由 5.7 m/s^2 下降至 3.9 m/s^2 ，导叶与主轴部位同样表现出稳定下降趋势，显示出该策略对中等振动扰动具有明显缓解作用。在高含沙条件下，系统仍保持较强控制能力，各关键部位振动值控制在警戒阈值以内，未触发保护停机逻辑。数据表明，分段关闭策略可显著降低水轮机在突发激振条件下的响应幅度，具备实用的工程推广潜力。

5 结语

研究对于泥沙环境下水轮机振动异常的问题，构建了基于 PLC 的实时分段关闭控制系统，识别各关键部位在含沙扰动下的非线性振动特征，设定以加速度幅值与频率波动率为判据的分段触发阈值，采用导水机构的分组控制方式实现分阶段响应，有效削弱水力扰动的传播强度。实测结果显示，转轮、导叶与轴承区域振动幅值均明显下降，系统在多工况条件下保持稳定性，未触发异常停机指令，控制策略具备良好的响应效果与结构保护能力。该方法适用于高含沙流域的水电机组振动抑制场景，可拓展至多参数融合判断与多段联动控制模式，提升复杂运行条件下的设备安全等级与自动化水平。

参考文献

[1] 周鹏,孙淑贞,郭鹏程,等. 分流叶片对混流式水轮机泥沙磨损特性影响的数值研究[J].水动力学研究与进展A辑,2024,39(05): 767-776.

[2] 李琛玺,李方,郭鹏程,等. 冲击式水轮机喷射机构结构参数对泥沙磨损特性的影响机制[J].水利学报,2025,56(01):93-105.

[3] 高杰,韩磊,郭传梁,等. 基于欧拉-拉格朗日方法的冲击式水轮机配水机构泥沙磨蚀机理研究[J].大电机技术,2024,(05):71-80.

[4] 邹旻,章光裕. 基于数据中台技术的泥沙磨损对高水头混流式水轮机运行效率下降程度影响评估技术研究[J].中国设备工程, 2024,(10):185-187.

[5] 覃蓓.冲击式水轮机泥沙磨损试验系统研发与测试方法研究[D]. 西华大学,2024.